

***В.І.КРАВЧЕНКО***, докт.техн.наук; ***В.С.БРЕСЛАВЕЦЬ***, канд.техн.наук;  
***О.А.СЕРКОВ***, канд.техн.наук; ***Н.Ю.ШАПОВАЛОВА***; НТУ «ХПІ»

## **МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ВСЕРЕДИНИ ЕКРАНОВАНИХ ПРИСТРОЇВ**

У статті розглянуто один із підходів до проблеми автоматизації розрахунків електромагнітної обстановки всередині екранованих споруд. Наведено аналіз існуючого стану справ та запропоновано електромагнітні випробування моделей екранів виконувати одночасно із розробкою реальної конструкції екранованого пристрою. Розроблено додаток до пакету комп'ютерних програм «Solid Works» та проведена перевірка його працездатності на конкретному прикладі.

This paper considers one of the approaches to the problem of automating the computations of electromagnetic environment inside the screened facilities. The state-of-art situation has been analyzed. It has been offered to perform electromagnetic tests simultaneously with development of real structure for a screening device. A supplement to the «Solid Works» program package has been developed and its fitness to work has been checked using a definite example.

**Вступ.** Існує досить велика кількість пакетів комп'ютерних програм для розробки конструкторської документації які дозволяють поряд із створенням конструкції створювати їх моделі для одночасного і всебічного випробування у галузі механічних навантажень. Це дає можливість виконувати необхідні доробки конструкції одночасно із її створенням. Відомими прикладами таких пакетів є пакети комп'ютерних програм «Авто-CAD» та «Проінженерінг». Але найбільш придатним для цього є пакет «Solid Works», який завдяки великої кількості додатків дозволяє проводити не тільки механічні випробування створеної моделі, а і температурні та динамічні випробування.

**Постановка проблеми.** У той же час питання забезпечення електромагнітної сумісності радіоелектронної апаратури на стадії її розробки не вирішені. Тому узагальнюючи накопичений багаторічний досвід експериментальних досліджень виникає необхідність щодо розробки інженерної методики визначення АЧП імпульсних електромагнітних полів, які проникають крізь неоднорідні корпуси – екрани при дії електромагнітного випромінювання.

**Аналіз літератури.** Загальний підхід до вирішення поставленої проблеми, наведено у роботі [1]. Причому результати [2], які було покладено в основу цього підходу, було додатково підтверджено як експериментально, так і більш суворими теоретичними дослідженнями [3]. Ці та інші данні, зокрема спрощені формули екранування для нескінченного циліндричного екрану [4], стали підґрунтям інженерної методики розрахунків електромагнітного випромінювання. З іншого боку, ефективна робота пакетів потужних комп'ютерних програм [5-8] дозволяє автоматизувати процес розробки при-

строїв сучасного машинобудування з урахуванням вимог електромагнітної сумісності.

**Метою статті** є розробка методики побудови додатку до пакету «Solid Works», який дозволить створювати конструкції електромеханічних, радіоелектронних, електронних з урахуванням вимог електромагнітної сумісності та проведенням поточного аналізу по додержанню вимог на будь-якій стадії розробки конструкції.

**Основна частина.** Програма автоматичного розрахунку АЧП електромагнітного випромінювання, що проникає крізь корпуси – екрани створена окремим додатком до пакету «Solid Works», який дозволяє здійснювати постійний обмін інформацією між основним пакетом та її додатком. Вона дає змогу визначити та візуально навести у тримірному просторі електромагнітну обстановку всередині розроблюваного корпусу – екрану з урахуванням існуючих отворів і щілин. Додаток має вбудовану базу даних електричних характеристик матеріалів, які закладаються у конструкцію і впливають на розрахунки процесів проникнення електромагнітного випромінювання всередину корпусу. Можливість поповнення бази даних додатковою інформацією дозволяє адаптувати розроблені моделі до реальної конструкції, що у свою чергу зменшує похибку розрахунків АЧП, яка не перевищує 3 дБ.

На рис. 1 наведено головне вікно розробленого додатку.

Схема алгоритму розрахунку електромагнітного поля всередині корпусу – екрану включає до свого складу завдання у додатку геометрії конструкції, яка є найближчою за формою до однієї з трьох типових форм: циліндрична, конічна чи конічна – циліндрична. Форма корпусу є найбільш наближеною до реального корпусу – екрану, а неоднорідності корпусу, якими є наприклад, отвори, щілини, обрані типовими та мають розміри набагато меншими, ніж найменший габаритний розмір корпусу, який у свою чергу значно менший довжини хвилі діючого електромагнітного випромінювання.

Одночасно розробляють реальну конструкцію корпусу у пакеті «Solid Works», і одержані реальні технічні характеристики (геометричні розміри, електротехнічні характеристики матеріалу конструкції) вводять у додаток для подальших розрахунків. Матеріалом корпусу є метал із ізотропними властивостями та відомими значеннями таких електричних параметрів, як питома електрична провідність та магнітна проникливість. Феромагнітні якості матеріалів використано у лінійному наближенні без урахування петлі гістерезису. На рис. 2 наведено модель реальної конструкції корпусу – екрану.

Введені вхідні данні дозволяють обчислити коефіцієнти форми конструкції  $n$ , які необхідні для подальших розрахунків. В залежності від обраної форми конструкції аналітичні співвідношення для обчислення обираються різними автоматично. Так для циліндричної форми екрану радіусом  $R$  і довжиною  $l$ :

ТЗ

Выбор типа экранирующей конструкции

☒ Цилиндрическая
 ☐ Конусная
 ☐ Конусно-цилиндрическая

Параметры экранирующей конструкции

Толщина стенки корпуса  $d$ , мм:   
 Радиус цилиндра (основания конуса)  $R$ , м:   
 Длина цилиндрической части  $l$ , м:   
 Угол при вершине конуса  $2\varphi$ , град:   
 Материал корпуса:

Параметры помехоустойчивого поля

$E(t) = E_0 k (\exp(-a_1 t) - \exp(-a_2 t)), \quad t > 0$   
 $E_0$ :   $a_1$ :   
 $k$ :   $a_2$ :

Параметры отверстия

Высота расположения центра  $A$ , м:   
☒ Прямоугольное ☐ Круглое  
 Длина  $a$ , м:  Ширина  $b$ , м:  Радиус  $a$ , м:

Рисунок 1 – Головне вікно додатку

$$n = \frac{\pi}{2 \arctg \left[ 1 / \sqrt{1 + 2(R/l)^2} \right]}; \quad (1)$$

Для конічної форми екрану радіусом  $R$  у основі й кутом  $2\varphi$  у вершині :

$$n = \frac{4 \sin \varphi}{\left[ \frac{3\delta(1+\delta)^2}{\sqrt{1+\delta}} \right] \lg \left[ \frac{\sqrt{1+\delta} + 1}{\sqrt{\delta(1+\delta)} - \delta} \right] + \left[ \frac{(1-2\delta)}{(1+\delta)^2} \right] - \left[ \frac{(2-\delta)\sqrt{\delta}}{(1+\delta)^2} \right]}, \quad (2)$$

де:  $\delta = \operatorname{ctg}^2 \varphi$ ;

У той же час для циліндрично-конічної форми корпусу, у якій циліндрична частина має довжину  $l$ , радіус  $R$  і кутом  $2\varphi$  у вершині конусної частини корпусу:

$$n = \frac{4\sqrt{1+2(R/l)^2}}{1 + \frac{\sqrt{1+2(R/l)^2}}{(1+\delta)^2 \sin \varphi} \left[ \frac{3\delta(1+\delta)^4}{\sqrt{1+\delta}} \ln \frac{\sqrt{1+\delta} + 1}{\sqrt{\delta(1+\delta)} - \delta} + (1-2\delta) - \sqrt{\delta(2-\delta)} \right]}. \quad (3)$$

Завдяки вхідним даним також обчислюють такі характеристики, як часова постійна екрану  $\tau_{\text{екк}} = \mu_0 \sigma R d / n$ , час дифузії електромагнітного поля у оболонку екрану  $\tau_{\text{оуф}} = \mu_0 \sigma d^2$  та час затримки розповсюдження електромагнітного

випромінювання крізь оболонку екрану  $\tau_p = 0,07 \tau_{\text{диф}}$ . Для обчислення із введених входних даних додатково використовують  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ , питому електропровідність матеріалу корпусу  $\sigma$  та товщину стінки корпусу – екрану  $d$ .

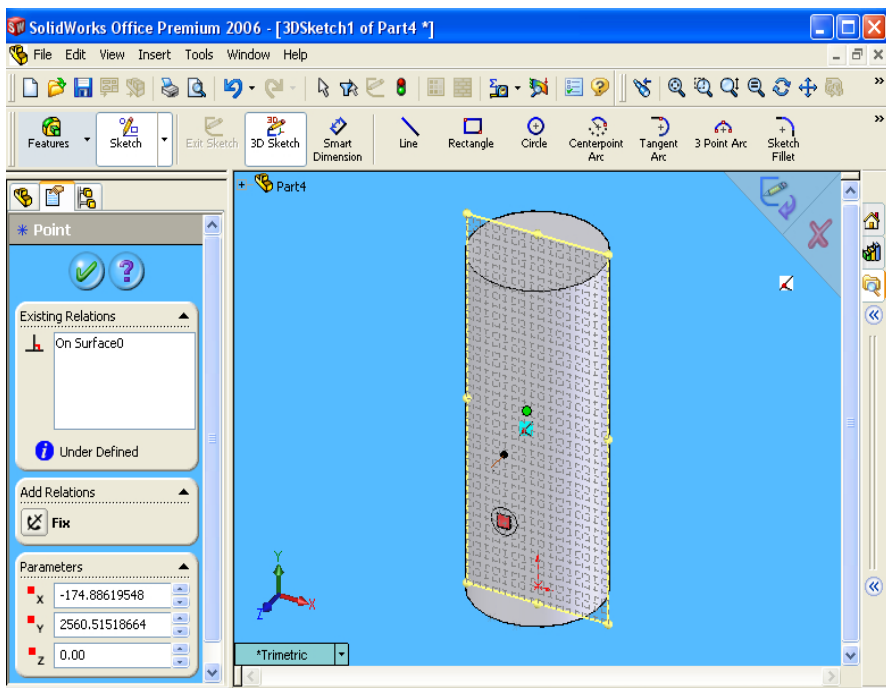


Рисунок 2 – Модель конструкції корпусу у пакеті «Solid Works»

Подальша методика розрахунків базується на використанні математичних моделей взаємодії електромагнітних полів із металевими корпусами у випадку довільної орієнтації головної осі корпусу – екрану відносно напрямку векторів діючого електромагнітного випромінювання. Причому зовнішнє електромагнітне поле до розташування у ньому корпусу є однорідним, параметри якого є типовими. У додатку можливо вводити як стандартні, так і довільні параметри електромагнітного випромінювання, форма якого має двох-експоненційну уяву. Обробка введеної інформації дозволяє побудувати часові залежності зовнішніх імпульсних сигналів та обчислити такі їх характеристики, як тривалість сигналу на рівнях 0,5 та 0,1 від максимального значення сигналу. Слід при цьому зазначити, що для кількісної оцінки ефективності екранування основним параметром є *коефіцієнт екранування*, який дорівнює відношенню амплітуд напруженості електричного чи магнітного поля у будь-якому місці всередині екрану до амплітуди напруженості поля у цьому ж міс-

ці за його відсутності. Тобто  $S_E = E_3/E_0$ ; а  $S_H = H_3/H_0$ . Для інженерних розрахунків, коли похибка не перевищує 12 %, оцінку амплітудних параметрів та часових характеристик імпульсних магнітних полів, що проходять крізь корпуси-екрани, визначають наступними співвідношеннями. Ія випадку, коли  $\tau_{\text{диф}} \leq \tau_u \ll \tau$ , коефіцієнт магнітного екранування  $S_H$  складає  $S_H = kn/\mu_0 \sigma R d a_1$ , тривалість фронту імпульсу на рівні 0,1–0,9 амплітуди  $\tau_\phi = 0,28 \tau_{\text{диф}}$ , а тривалість імпульсу на рівні 0,5 амплітуди  $\tau_u = 0,69 \tau_{\text{экр}}$ .

У той же час, коли  $\tau_{\text{экр}} \leq \tau_u$ , коефіцієнт магнітного екранування  $S_H = \exp \left[ \frac{-\ln[\tau_{\text{экр}} a_1 / (\tau_{\text{экр}} a_1 - 1)]}{\tau_{\text{экр}} a_1} \right]$ ; тривалість фронту імпульсу на рівні 0,1–0,9

амплітуди складає  $\tau_\phi = \left| \frac{\tau_{\text{экр}} \ln(\tau_{\text{экр}} a_1)}{1,25(\tau_{\text{экр}} a_1 - 1)} \right|$ , а тривалість імпульсу на рівні 0,5 ам-

плітуди  $\tau_u = \sqrt{\tau_u^2 + \tau_s^2}$ .

Ослаблення напруженості складових електромагнітного випромінювання, яке проникає всередину екрану крізь електричні неоднорідності визначають за допомогою коефіцієнта ослаблення поля  $\mathfrak{A} = \exp(-\alpha_{E,H} d)$ , де значення  $\alpha_{E,H}$  залежить від форми та розмірів отворів. Ці параметри, а також місця розташування отворів на екрані завдають у головному меню додатку. Так для круглого отвору радіусом  $a$  коефіцієнти визначені наступними співвідношеннями:  $\alpha_E = 2,4/a$ ;  $\alpha_H = 1,84/a$ . У той же час для прямокутного отвору шириною  $b$  та довжиною  $a$ , коли вектор  $\mathbf{H}_1$  орієнтовано паралельно меншій стороні отвору, ці співвідношення мають наступний вигляд:

$$\alpha_E = \pi \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}}; \quad \alpha_H = \pi/b.$$

За результатами обчислення визначають параметри складових електромагнітного випромінювання у найбільш небезпечному чи довільному місці екрану, яке обрано на конструкції розроблюваного корпусу – екрану. На рис. 3 наведено результати обчислення складових зовнішнього поля, внутрішнього поля та координат обраного місця у корпусі – екрані. Крім того, у додатку передбачено можливість більш докладного надання результатів розрахунків. Один із можливих прикладів наведено на рис. 4.

**Висновки.** Таким чином розроблена інженерна методика автоматизованого розрахунку структури електромагнітного поля всередині корпусу – екрану дає змогу забезпечити відповідність вимогам електромагнітної сумісності широкого кола радіоелектронного обладнання на стадії його створення. Крім того, вона стає ґрунтом для визначення рівня наведеного струму і напруг на елементах радіоелектронного обладнання, яке знаходиться всередині екрану.

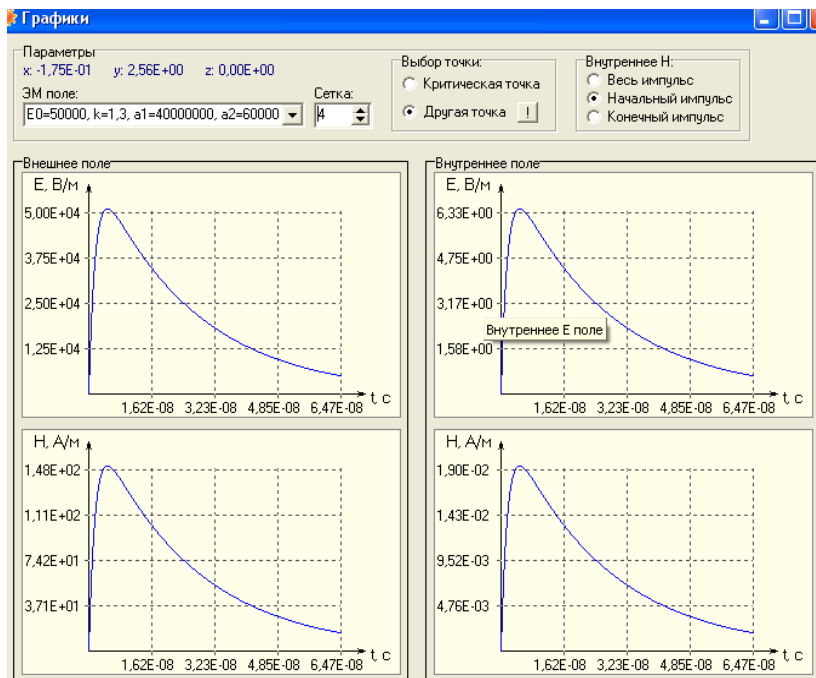


Рисунок 3 – Результаты обчислення складових електромагнітного випромінювання

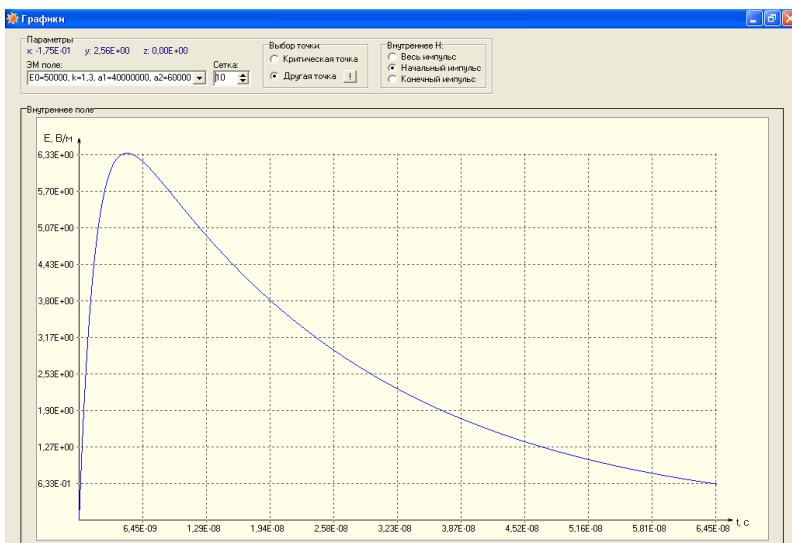


Рисунок 4 – Результаты розрахунку електричної складової всередині корпусу – екрану

**Список літератури:** 1. Рикетс Л.У., Бриджес Дж. Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты / Под ред Н.А. Ухина. – М.: Атомиздат, 1979. – 328 с. 2. Miller D.A., Bridges J.E. / IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility. – 1968. – V. 10, № 1. – P. 52. 3. Kaden H. Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik. – Berlin, Springer, 1959. 4. Shenfeld S. / IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility. – 1969. – V. 10, № 1. – P. 29. 5. Тику Ш. Эффективная работа: SOLIDWORKS. – СПб.: Питер, 2005. – 768 с. 6. В.П. Прохоренко SOLIDWORKS 2005. Практическое руководство. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2005. – 512 с. 7. Дэвид Мюррей SOLIDWORKS 2003. – Издательство «Легу», 2003-2004. 8. Багрянцева Т.Ф., Домнин Ф.А., Кравец В.А., Серков А.А., Багрянцева Е.В., Ключевич Е.А. Объектно-ориентированное конструирование изделий современного машиностроения. – Харьков, НТУ «ХПИ», 2006. – 170 с.

*Надійшла до редколегії 23.10.2006.*

УДК 621.319.7.001

**В.В.КНЯЗЕВ**, канд.техн.наук, НТУ «ХПИ»

## **АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПРОНИКНОВЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЧЕРЕЗ ЭЛЛИПТИЧЕСКОЕ ОТВЕРСТИЕ В ПРОВОДЯЩЕЙ ПЛОСКОСТИ**

У статті наведено аналітичне рішення задачі проникнення високочастотного магнітного поля крізь еліптичну апертуру в площині, що проводить електричний струм. Рішення рівняння Лапласа з граничними умовами Діріхле отримано методом розподілу параметрів, які змінюються, в еліпсоїдальній системі координат. Знайдене рішення дало змогу визначити похибку використання метода еквівалентних дипольних моментів при розрахунках структури поля, яке проникає крізь апертури різноманітної форми. Це рішення використовується як тест відповідних прикладних програм для ЕОМ.

This paper gives the analytical solution of a problem related to the penetration of the high –frequency magnetic field through the elliptic aperture in electric current conducting plane. The Laplace equation with Dirichlet's boundary conditions was solved using the method of distribution of parameters that are varying in the ellipsoidal coordinate system. This method of solution allowed for the determination of error related to the use of the method of equivalent dipole moments at calculating the field that penetrates through the aperture of a different form. It is a good tool for testing the appropriate application computer programs.

Актуальность расчетной оценки уровня и пространственной структуры электромагнитного поля, проникающего в пространство, ограниченное проводящей оболочкой, которая имеет различные нарушения своей целостности (отверстия, щели, швы и т.п.) сохраняется до сих пор. Важным является получение математически строгих решений (аналитических), которые могут быть использованы для тестирования компьютерных программ, реализующих численные методы решения задач электромагнитного экранирования. Степень достоверности результатов численного решения во многом зависит от